УДК 537.534.2

ГЕНЕРАЦИЯ ЭМИТТИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ БОЛЬШОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

В.П. Нархинов

Отдел физических проблем при Президиуме БНЦ СО РАН. г. Улан-Удэ
E-mail: lib@pres.bsc.buryatia.ru

Предложен и реализован эффективный метод получения объемной плазмы, ограниченной двумя плоскопараллельными катодами большой площадью поверхности в цилиндрическом пространстве общего анода малой высоты. Рассмотрены процессы, протекающие в различных режимах генерации объемной плазмы. Определены пороговые значения параметров тлеющего разряда с полым катодом.

Введение

Расширяющееся применение электронных пучков большого сечения в электрофизических и технологических установках стимулирует улучшение параметров традиционных источников на термокатодах и холодных катодах [1–3] и разработку источников на основе плазменных эмиттеров [4, 5].

Известные способы создания объемного разряда основываются на осуществлении предварительной ионизации газовой среды, которая может быть произведена вспомогательным разрядом. В общем случае, такие системы можно рассматривать как системы с "двойным разрядом", поскольку имеют место два различных разряда [6].

Эффективность генераторов плазмы определяется в основном минимальными затратами мощности в разряде и ресурсом. Таким требованиям удовлетворяют кольцевые источники плазмы с холодным полым катодом [7–10].

В настоящей работе описан механизм проникновения заряженных частиц плазмы вспомогательного пеннинговского разряда в катодную полость, даны оценки пробоя газового промежутка и режимов горения объемного разряда, указаны возможные пути улучшения параметров данной газоразрядной системы.

Методика эксперимента и полученные результаты

Конструктивные особенности обусловили выбор кольцевой геометрии разрядной камеры вспомогательного разряда с азимутально-однородной плазмой [11]. "Поджигающий" разряд возбуждает объемный разряд в цилиндрической полости, ограниченной двумя плоскопараллельными катодами.

Схематично (рис. 1, *а*, *б*, масштаб не соблюден) генератор объемной плазмы представляет собой разрядную камеру, образованную общим анодом – 1 (внутренний цилиндр тороида), сплошным катодом – 5 и сетчатым катодом – 6 с окном – 7, прозрачностью 0,64. Рабочий газ поступает в камеру вспомогательного разряда и откачивается через эмиссионную щель – 4 сквозь сетчатое окно – 7. Вспомогательный и основной разряды питаются от единого стабилизированного источника тока с плавно регулируемым выходным напряжением 0...1,5 кВ. Анод подключен через $R_б$=200 Ом. При включении схемы контакты К1, К2, К3 замыкаются и зажигается вспомогательный разряд.

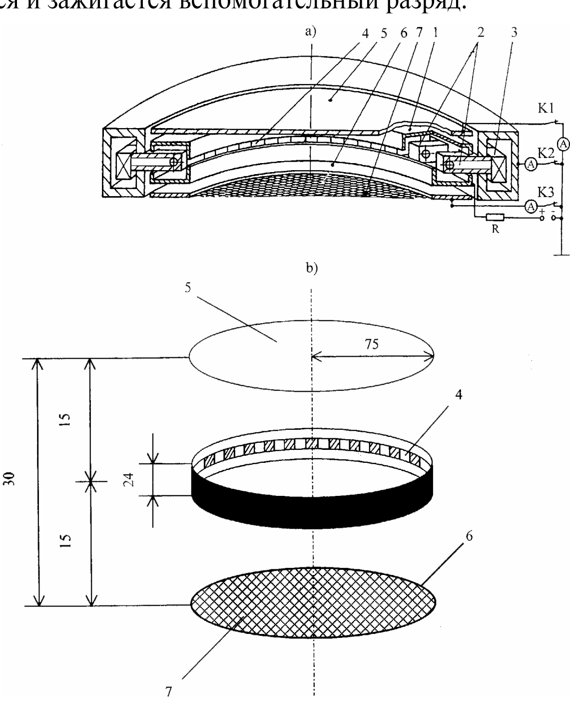


Рис. 1. *Конструктивная схема генератора объемной плазмы: 1) общий полый анод; стержни) полюсные наконечники; 3) постоянные магниты внешнего магнитного поля; 4) эмиссионная щель; 5) сплошной катод; 6) сетчатый катод; 7) выходное окно сетчатого катода*

На рис. 2 приведены ВАХ разрядов и зависимость ионного тока на катодах от тока вспомогательного разряда. В режиме горения вспомогательного разряда с растущей характеристикой на участке АВ протяженность области анодного падения потенциала $l_a \approx (\varphi_0 - \varphi_a)^{3/4} j^{-1/2}$, где φ_0 – потенциал плазмы, φ_a – потенциал анода, [2] превышает высоту проходного сечения окна эмиссионной щели и отделяет плазму вспомогательного разряда от пространства катодной полости. Несмотря на это, в цепи катодов – 5 и 6 фиксируется слабый ток ионов. С ростом разрядного тока (рис. 2, *а*) до 200 мА ионный ток достигает 0,15 мА и плазма вспомогательного разряда радиально проникает в цилиндрическую полость, поскольку ленгмюровский слой перед апертурой эмиссионной щели разрывается.

Механизм и физическая картина проникновения плазмы в катодную полость представляется следующим.

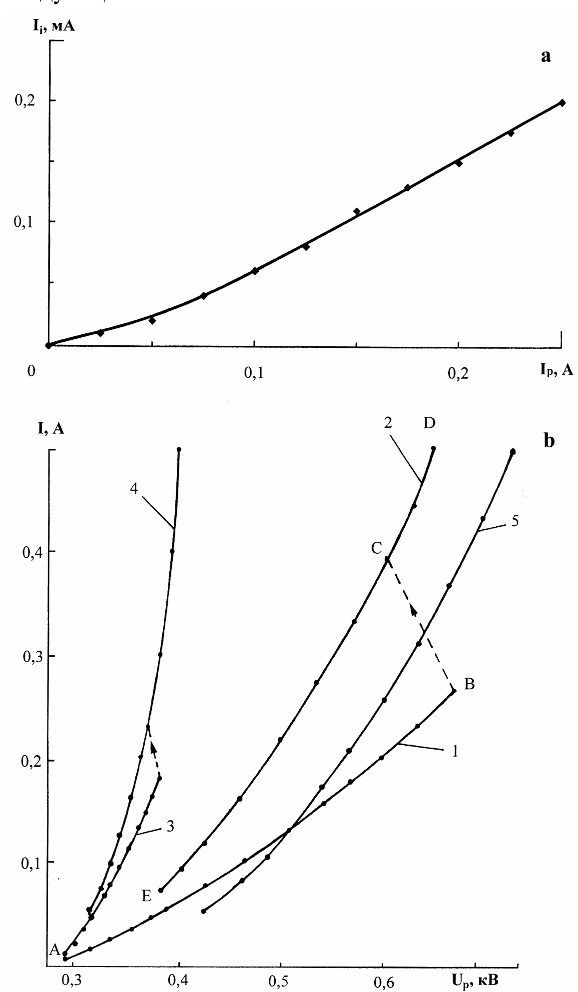


Рис. 2. *Зависимость ионного тока на катодах от тока вспомогательного разряда (а) и разрядные ВАХ (б): кривая 1 – вспомогательный разряд; кривая 2 – основной, объемный разряд тлеющего типа; кривая 5 – режим объемного разряда без доли вспомогательного разряда при давлении газа ~0,026 Па; кривые 3 и 4 сняты при давлении ~0,066 Па*

При наличии внешней неэлектрической силы, перпендикулярной магнитному полю (направление вакуумной откачки), плазма, как целое, двигается в направлении силы с ускорением. Более того, движение плазмы в магнитном поле может быть вызвано и силами, обусловленными неоднородностью магнитного поля в 28-и разрядных ячейках. Под действием центробежной силы, обусловленной движением частиц вдоль силовых линий, и диамагнитной силы, связанной с ларморовским вращением частиц, заряженные частицы плазмы должны двигаться в направлении уменьшения магнитного поля от внешней магнитной стенки из набора постоянных магнитов – 3 (рис. 1, *а*) со значением магнитной индукции B~0,1 Тл, в сторону ослабления, т.е. в направлении эмиссионной щели – 4 с выходом в пространство за анодом с магнитной индукцией B~0,02 Тл. Измерения в данных областях проводили прибором РШ1–10. Плазма является источником ионов и ультрафиолетового излучения, эти ионизаторы увеличивают выход электронов с катодов [12].

В результате катодных и ионизационных процессов плотность плазмы увеличивается, резко возрастает ток разряда и одновременно снижается напряжение горения разряда (переход из точки *B* в точку *C*, рис. 2, *б*). Зажигается основной разряд с явно выраженным эффектом полого катода и горит в широком диапазоне токов на участке *ЕД*, кривая 2. При токе ~70 мА основной разряд гаснет. Верхний предел тока объемного разряда лимитировался мощностью источника питания разряда. Экспериментально установлено (кривая 5), что после отключения цепи вспомогательного разряда (ключ К2 – разомкнут) основной разряд устойчиво горит в диапазоне тока 50...500 мА. При сравнении кривых 2 и 5 разрядных характеристик, эффективность "коллективного" горения разрядов очевидна.

С повышением давления аргона происходит более крутой рост разрядного тока, зажигание объемного разряда облегчается, поскольку его возбуждение происходит при меньших значениях напряжения горения вспомогательного разряда (кривая 4 снята при p ~ 0,066 Па).

Тлеющий разряд низкого давления характеризуется в основном прикатодными процессами; осциллирующие электроны не попадают на анод, поскольку в объеме разряда вне незначительного прианодного слоя радиальное электрическое поле отсутствует. Колебания вторичных электронов в потенциальной "ловушке" вызывают рост ионизационных процессов в расширенной катодной полости, приводящий к увеличению плотности плазмы и разрядного тока. Таким образом, аномальность тлеющего разряда низкого давления можно объяснить режимом полого катода.

Широко известные плазменные эмиттеры непрерывного действия с большой поверхностью [4, 5] на основе аксиальной инжекции заряженных частиц из отражательного разряда с холодным полым катодом в специальный полый электрод-расширитель работают в разных режимах. Наиболее эффективным считается режим объемного разряда в формирователе, а проникающая плазма вспомогательного разряда обеспечивает зажигание этого разряда. Однако реализация такого режима требует либо увеличения давления в формирователе ≥0,05 Па, что ухудшает прочность ускоряющего промежутка, либо наложения магнитного поля на разряд. В силу этого требуется ввод дополнительных элементов, что усложняет конструктивную схему в целом и увеличивает энергоемкость газоразрядного устройства. Для создания относительно равномерного распределения заряженных частиц в плазме объемного разряда удобны системы с несколькими локальными источниками. Источники, в качестве которых используются обращенные газовые магнетроны [13], размещены на боковой поверхности анодной камеры. Для достижения рав-

номерности распределения заряженных частиц по всей длине прямоугольной анодной камеры применены дополнительные меры для компенсации краевых эффектов за счет увеличения тока на катоды крайних газомагнетронов.

Анализ условий образования объемной плазмы и механизмов ее формирования, исключающих пространственную неоднородность распределения заряженных частиц, свидетельствует о низкой эффективности плазменных эмиттеров подобного типа.

Метод многосторонней радиальной "накачки" заряженными частицами катодной полости объемной разрядной камеры изначально исключает вышеобозначенные проблемы образования плазмы, а режим "коллективного" горения в единой газоразрядной системе электродов формирует присеточную плазму с достаточно равномерным распределением плотности заряженных частиц.

При разработке и создании генераторов объемной плазмы следует найти разумный технический подход и решить многофакторную оптимизационную задачу по определению геометрических, электрофизических и вакуумных параметров.

Пробой в газе зависит от концентрации электронов, созданных вблизи катодов внешним ионизатором или выбитыми ионами с поверхности развитых плоскопараллельных катодов, которые размножаются, двигаясь через катодный слой к области квазинейтральной плазмы. Поскольку вспомогательный (инициирующий) тлеющий разряд в магнитном поле является источником интенсивного ультрафиолетового излучения, то для увеличения числа начальных фотоэлектронов в плазмообразующий газ Ar можно вводить легкоионизуемые добавки в виде органических соединений, например, диметиланилин или молекулы NO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
2. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
3. Кан Х.С., Дроздецкая Л.П., Аброян М.А. и др. Создание и исследование холодных катодов для формирования электронных пучков большого сечения: Тез. докл. VII Всес. симпозиума по сильноточной электронике. – Томск, 1988. – Ч. 1. – С. 70–72.
4. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 115 с.
5. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: УИФ "Наука", 1993. – 148 с.
6. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
7. Семенов А.П., Нархинов В.П. Плазменный эмиттер на основе тлеющего разряда в электродной структуре сетчатого и пластинчатого катодов большой площадью // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – № 3. – С. 98–102.
8. Пат. 2096857 РФ. Широкоапертурный плазменный эмиттер / А.П. Семенов, В.П. Нархинов. Заявлено 01.03.96. Опубл. 21.11.97, Бюл. № 32. – 10 с: Ил. 1.
9. Narchinov V.P. Gas discharge electron source with radially wide and axially narrow cylinder cavity // Proc. of 5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk: Vodoley, 2000. – P. 214–217.
10. Нархинов В.П. Новые кольцевые источники плазмы с полыми катодами // Теплофизика высоких температур. – 2004. – № 6. – С. 980–982.
11. Семенов А.П., Нархинов В.П. Сильноточный тлеющий разряд в электродной структуре стержневых катодов с полым анодом // Журнал технической физики. – 1993. – Т. 63. – № 8. – С. 17–24.
12. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. – М.: Наука, 1971. – 544 с.
13. Бойко В.В., Кузьмичев А.И., Суханов В.Н. и др. Плазменная эмиссионная электроника // Труды I Всес. совещания по плазменной эмиссионной электронике. – Улан-Удэ, 1991. – С. 106–109.